

柴油机燃用油焦浆试验*

向立明 李兴虎 谷慧思 毕 芸
(北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100191)

【摘要】 在一台安装了油焦浆燃料供给系统的 R180 型柴油机上,进行了燃用油焦浆的试验。测量了发动机燃用油焦浆时的转速、转矩、燃料消耗量、排气温度、HC、CO、NO_x 和碳烟排放量等参数,并与原机燃用 0 号柴油进行了对比。试验结果表明,在 1 200、1 600、1 800 r/min 转速下,发动机燃用油焦浆时最大输出功率比燃用柴油时分别下降了约 6.2%、19% 和 21%,排气温度平均升高了约 5.3%、19.1% 和 34.2%。HC 排放量在 1 200 r/min 时比柴油低,在 1 600、1 800 r/min 时两者比较接近;CO 排放量在 3 种转速下和柴油相近;NO_x 排放量在 3 种转速下比柴油低;碳烟排放量在 1 200 r/min 时与柴油比较接近,在 1 600、1 800 r/min 时比柴油高。

关键词: 柴油机 油焦浆 燃烧 排放 试验
中图分类号: TK46+4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)07-0005-05

Diesel Engine Fueled with Petroleum Coke Slurry

Xiang Liming Li Xinghu Gu Huisi Bi Yun
(School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract

The new petroleum coke slurry fuel system was adopted in a R180 diesel engine, and an investigation was carried out in the modified diesel engine with fuel of petroleum coke slurry. The speed, torque, specific fuel consumption, exhaust gas temperature, and HC, CO, NO_x, smoke emission concentrations of the engine with fuel of petroleum coke slurry were measured respectively, and the comparison to the engine with fuel of No. 0 diesel fuel was made. The results show that under the conditions of 1 200, 1 600, 1 800 r/min and burning petroleum coke slurry, engine maximum power is reduced by about 6.2%, 19% and 21% respectively compared with burning diesel fuel, and the average exhaust gas temperature increases by about 5.3%, 19.1% and 34.2% respectively; the HC emissions reduced at 1 200 r/min, and are similar to the diesel fuel at 1 600, 1 800 r/min; the CO emissions are close to diesel fuel; the NO_x emissions decreased; the exhaust smoke density is similar to diesel fuel at 1 200 r/min, and is higher than diesel fuel at 1 600, 1 800 r/min.

Key words Diesel engine, Petroleum coke slurry, Combustion, Emissions, Experiment

引言

为了优化我国燃料结构,减少对石油燃油的依赖,新型替代燃料的研究受到空前重视,对甲醇、乙醇、二甲醚、沼气、氢气及各种生物柴油都在进行积极探索^[1~6],但对固液混合浆体燃料——油焦浆在内燃机中作为替代燃料的研究很少。油焦浆是粉碎

的石油焦固体颗粒与柴油、添加剂混合而成的一种新型浆体燃料。目前主要在燃油锅炉中作为代用燃料^[7~8],其作为柴油机替代燃料的开发也受到了高度关注。
油焦浆与油煤浆、水煤浆有许多相似的物化特性,而油、水煤浆在柴油机中燃烧,国内外都有许多成功的经验^[9~14]。本文借鉴油、水煤浆在柴油机中

收稿日期: 2010-09-16 修回日期: 2010-11-24
* “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2007BAA09B05)
作者简介: 向立明,博士生,主要从事内燃机代用燃料、低污染燃烧和汽车环保技术研究,E-mail: xlm106@ae.buaa.edu.cn
通讯作者: 李兴虎,教授,博士生导师,主要从事内燃机代用燃料、低污染燃烧和汽车环保技术研究,E-mail: lxh@buaa.edu.cn

燃烧的研究成果,并结合油焦浆直接在柴油机中燃烧后,很容易出现燃油供给系统堵塞和卡死这一问题,设计一套油焦浆燃料供给系统,并安装在一台 R180 型柴油机上,进行燃烧油焦浆的试验。

1 试验装置与试验条件

1.1 油焦浆燃料供给系统

油焦浆燃料供给系统由油焦浆泵、油焦浆喷射器及其润滑系统等组成。图 1 是油焦浆泵和油焦浆喷射器的润滑系统简图。该润滑系统由驱动齿轮、润滑油泵、润滑油容器和三通接头等构成,其中驱动齿轮主动轮与发动机凸轮轴输出端连接。油焦浆喷射器是在传统轴针式喷油器基础上开发的专用喷射器,其针阀体内腔开有润滑油腔,通过在针阀体与喷射器体增开的润滑油通道与外界相通;油焦浆泵是在传统柱塞式喷油泵基础上开发的专用泵,其柱塞体内腔开有润滑油腔,通过在泵体增开的润滑油通道与外界相通。驱动齿轮带动润滑油泵工作,润滑油在润滑油泵作用下不断循环流动,将渗透到油焦浆喷射器和油焦浆泵润滑油腔中的油焦浆带出,防止微小固体颗粒堵塞、卡死针阀偶件和柱塞偶件。试验所用润滑油为柴油,当润滑油变脏之后经过滤可倒入油焦浆中作为燃料燃烧,再更换新的柴油作为润滑油。

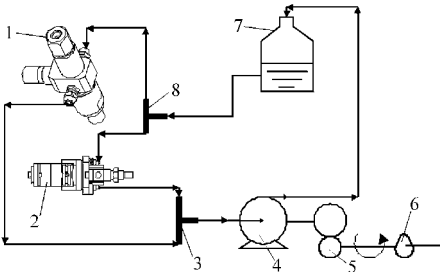


图 1 油焦浆泵和油焦浆喷射器润滑系统简图

Fig.1 Schematic of the petroleum coke slurry pump and the petroleum coke slurry injector lubricating system

1. 油焦浆喷射器 2. 油焦浆泵 3, 8. 三通接头 4. 润滑油泵
5. 驱动齿轮 6. 发动机凸轮轴 7. 润滑油容器

为了尽可能多的利用石油焦,同时又达到替代柴油的目的,应尽量增大油焦浆中的石油焦颗粒含量。但随着油焦浆中石油焦含量增大,油焦浆粘度也增大,这对油焦浆的泵送和雾化不利。经过多次试验最后采用质量分数为 30% 的油焦浆,即由占总质量 30% 的石油焦粉(由石油焦经机械和气流粉碎得到,其粒径尺寸在 0.3 ~ 10 μm 之间,平均粒径约为 2 μm)和占总质量 70% 的柴油再加极少量添加剂,在 1 000 ~ 2 000 r/min 转速下充分搅拌 10 ~ 20 min 后形成的浆体燃料,在室温下其粘度大约是

柴油的 100 倍,其低热值稍低于柴油。

1.2 试验台架

本研究所采用的试验台架如图 2 所示。台架由测功机、油焦浆燃料供给系统、发动机、电子天平、温度传感器、排气分析仪和烟度计等构成。发动机与 CW50 型电涡流测功机相连接,测功机用来测量不同工况下发动机的转速和转矩;油焦浆泵和油焦浆喷射器与原机传统喷油泵和喷油器安装位置相同,油焦浆泵由曲轴带动的凸轮轴驱动,油焦浆喷射器安装在气缸盖上;油焦浆喷射压力与柴油一样都约为 14 MPa,喷射时油焦浆的温度与柴油一样都是在室温下,且油焦浆是独立喷入燃烧室的;使用 LT500B 型电子天平来测量不同试验条件下的油焦浆和柴油的消耗量;采用 FGA-4100 型排气分析仪测量发动机排气中 HC、CO 与 NO_x 的体积分数;使用 K 型温度传感器测量排气温度;采用 495/01 型不透光式烟度计检测发动机碳烟排放。

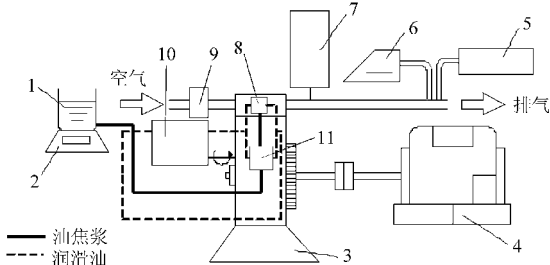


图 2 油焦浆燃料试验台架结构简图

Fig.2 Schematic of test bench for petroleum coke slurry fuel

1. 燃料容器 2. 电子天平 3. 发动机 4. 测功机 5. 烟度计
6. 排气分析仪 7. 温度传感器 8. 油焦浆喷射器 9. 空气滤清器
10. 油焦浆泵和油焦浆喷射器润滑系统 11. 油焦浆泵

试验所使用的发动机是 R180 型柴油机,机型为卧式、单缸、蒸发水冷及涡流室式。其主要技术参数见表 1。

表 1 发动机主要技术参数

Tab.1 Engine specifications

参数	数值
缸径/mm	80
活塞行程/mm	80
压缩比	21
排量/L	0.4
额定功率/kW(r/min)	5.67(2 600)
喷油压力/MPa	13.72 ± 0.5

1.3 试验条件

试验在发动机充分暖机至沸水时进行。所有数据都在工况稳定后测量,且转速、转矩、燃油消耗量及排放、排气温度等均同时测量。试验使用 0 号柴

油和质量分数为 30% 的油焦浆两种燃料,且统一采用质量法来测量两种燃料的消耗量。排气分析仪根据 GB 20891—2007 及制造厂的规定进行了标定。试验前发动机按照厂家规范进行了调整,试验为发动机转速 1 200、1 600、1 800 r/min 时的负荷特性和排放特性的对比试验。在每次试验完成停机之前,都要用柴油冲洗油焦浆燃料供给系统,以免残留在系统中的油焦浆微小固体颗粒沉淀堆积在管路和油道内。

2 试验结果与分析

2.1 负荷特性分析

图 3 是燃料消耗率随发动机功率变化的曲线。试验时在每一转速下,由小到大逐渐调节油门开关增大发动机功率,直到该转速下发动机最大输出功率点为止。由图可知,在每一固定转速下,发动机燃烧油焦浆时的燃料消耗率都大于柴油;随着转速的增加,发动机燃烧油焦浆时的最大输出功率比柴油分别降低了约 6.2%、19% 和 21%。这是由于油焦浆低热值低、难以完全燃烧和燃烧效率低所致。因为固体颗粒需要充分长的时间来加热和点燃,且燃烧时间比柴油液滴燃烧时间长^[10],因而油焦浆中固体颗粒没完全燃烧就随废气排出。随着发动机转速的提高,在燃烧室没有完全燃烧的油焦浆固体颗粒比例增多,导致了与燃烧柴油时最大输出功率之差增大。

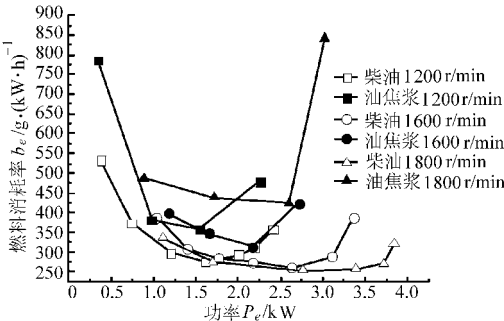


图 3 燃料消耗率随功率变化曲线

Fig. 3 Variation curves of specific fuel consumption with the power of engine

图 4 是发动机排气温度随功率的变化。发动机转速分别为 1 200、1 600、1 800 r/min 时,燃烧油焦浆的排气温度比柴油平均升高了约 5.3%、19.1% 和 34.2%。这是因为发动机燃烧油焦浆时,油焦浆中固体颗粒燃烧缓慢,并且随着转速提高,在燃烧室中没有完全燃烧的颗粒比例增大,随废气排出后在排气管中继续燃烧的放热量增多,即相对于发动机燃烧柴油而言,燃烧油焦浆时发动机排气带走了更多热量,导致与燃烧柴油时的排气温差随转速而增大。

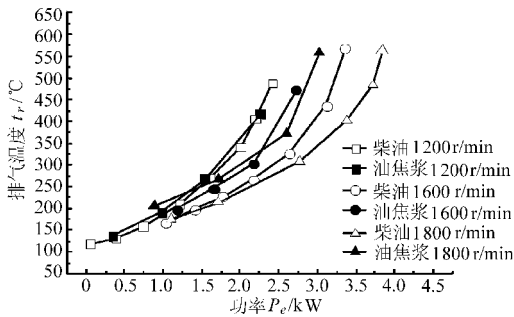


图 4 发动机排气温度随功率变化曲线

Fig. 4 Variation curves of exhaust temperature with the power of engine

2.2 排放特性分析

2.2.1 HC 排放

图 5 是柴油消耗量随功率的变化。由于柴油机 HC 生成的途径是柴油的不完全燃烧;油焦浆中的石油焦颗粒主要成分是碳,因而可通过比较两种燃料的柴油消耗量来说明 HC 的排放特性。图 6 是油焦浆和柴油的 HC 排放量对比。由图可知,随着转速的提高,发动机燃烧柴油时 HC 排放量降低。这是因为在较低转速 1 200 r/min 下,燃烧室内涡流较弱,柴油与周围空气形成的混合气很不均匀。另外,在小负荷下,喷入的柴油总量少,燃烧室温度低,不利于柴油的燃烧,从而导致发动机燃烧柴油时在 1 200 r/min 转速下 HC 排放量较高。发动机转速升高之后,柴油在燃烧室中的燃烧条件得到明显改善,燃烧比较充分,HC 排放量也随之降低。

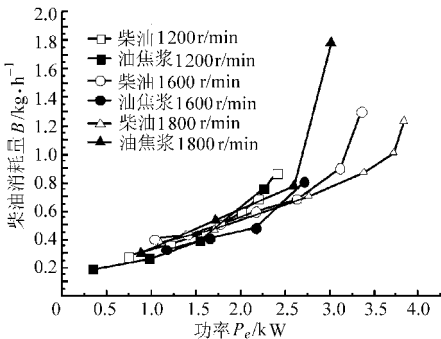


图 5 柴油消耗量随功率的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of diesel fuel consumption with the power of engine

在 1 200 r/min 转速下,发动机燃烧油焦浆时的 HC 排放量比柴油低。由图 5 可知,在该转速下,发动机燃烧油焦浆达到最大输出功率点之前,所消耗的柴油消耗量低于发动机燃烧柴油时的柴油消耗量;由图 4 可知,在发动机燃烧油焦浆达到最大输出功率点之前,燃烧油焦浆时的排气温度高于柴油,有利于在燃烧室内没完全燃烧的油焦浆中的柴油进一步氧化。这样,在 1 200 r/min 转速下发动机燃烧油焦浆达到最大输出功率点之前,燃烧油

焦浆时的 HC 排放量低于柴油。由图 5 可知,在发动机燃烧油焦浆达到最大输出功率点时,所消耗油焦浆中的柴油含量与发动机燃烧柴油时在该功率点下的柴油消耗量接近;由图 4 可知,发动机燃烧油焦浆达到最大输出功率点时排气温度与燃烧柴油时在该功率点的排气温度比较一致。因而在 1 200 r/min 发动机燃烧油焦浆达到最大功率点时,HC 排放量与发动机燃烧柴油时在该功率点的 HC 排放量比较接近。

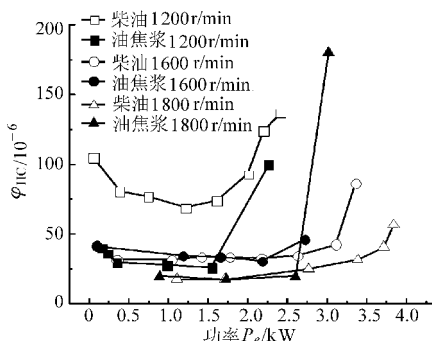


图 6 油焦浆和柴油的 HC 排放量对比

Fig. 6 Comparison of HC emissions between petroleum coke slurry and diesel

在 1 600、1 800 r/min 转速下,发动机燃烧油焦浆达到最大输出功率点之前,HC 排放量与燃烧柴油时比较接近;发动机燃烧油焦浆达到最大输出功率点时,HC 排放量比发动机燃烧柴油时在该功率点的 HC 排放量高。由图 5 可知,这是由于在发动机燃烧油焦浆达到最大功率点之前,油焦浆中的柴油消耗量与发动机燃烧柴油时的柴油消耗量相接近,因而 HC 排放量也比较接近;在发动机燃烧油焦浆达到最大功率点时,所消耗油焦浆中的柴油消耗量比在该功率点时发动机燃烧柴油的消耗量大,因而 HC 排放量也高。

2.2.2 CO 排放

图 7 是油焦浆和柴油的 CO 排放量对比。由图可以看出,在 3 种不同转速下,发动机燃烧油焦浆达到最大输出功率点之前,CO 排放量和柴油比较一致;在燃烧油焦浆达到最大输出功率点时,CO 排放量比发动机燃烧柴油时在该功率点的 CO 排放高。这是由于发动机燃烧油焦浆达到最大输出功率点以前,混合气中的氧气含量比较充足,而 CO 只是燃烧的中间产物,大部分 CO 最后生成 CO_2 ,发动机燃烧柴油时的情况也一样,因而二者 CO 排放比较一致且保持一定质量分数不变。发动机燃烧油焦浆达到最大输出功率点时,燃空比增加,燃烧室中局部缺氧区域增加,CO 由于混合气过浓燃烧不完全而增加。另外,还由于油焦浆中 C/H 大于柴油,因而发动机燃烧油焦浆达到最大输出功率点时,CO 排放量

比发动机燃烧柴油时在该功率点的 CO 排放量高。

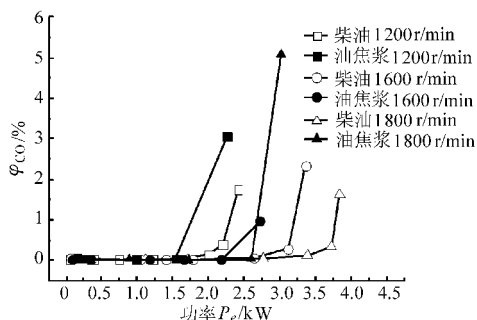


图 7 油焦浆和柴油的 CO 排放量对比

Fig. 7 Comparison of CO emissions between petroleum coke slurry and diesel

2.2.3 NO_x 排放

图 8 是油焦浆和柴油的 NO_x 排放量对比。在 3 种转速下,发动机燃烧油焦浆时 NO_x 的排放量都比柴油低,这是由于油焦浆和柴油的燃烧特性不同所致。首先是油焦浆低热值低;再就是油焦浆中柴油先燃烧,然后是固体颗粒燃烧,由于固体颗粒滞燃期长,在燃烧室没充分燃烧放热就随废气排出,导致燃烧室温度较低。发动机燃烧柴油时,由于柴油低热值高,燃烧快,结果燃烧室温度较高。因而发动机燃烧油焦浆时燃烧室的温度要低于燃烧柴油时的温度, NO_x 排放量也就比柴油低。由图 8 还可以看出,两种燃料燃烧时 NO_x 排放量都呈现出先上升后下降的趋势。这是由于在小负荷时,混合气有充足的氧但燃烧室温度低,故 NO_x 排放量也较低;随着负荷的增加,燃烧室内混合气温度升高, NO_x 排放量都呈现出上升的趋势;当负荷进一步增加,混合气的氧浓度降低,抑制了 NO_x 的生成, NO_x 排放量又都呈下降的趋势。

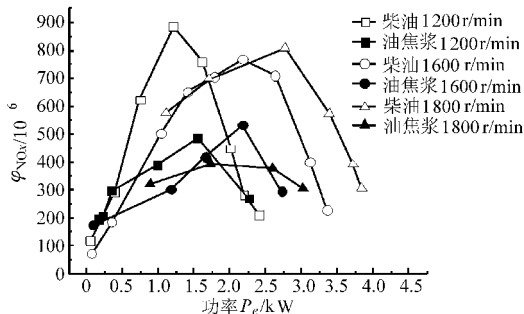


图 8 油焦浆和柴油的 NO_x 排放量对比

Fig. 8 Comparison of NO_x emissions between petroleum coke slurry and diesel

2.2.4 碳烟排放

碳烟排放的大小用排气消光系数来表示。图 9 是油焦浆和柴油的碳烟排放对比。在 1 200 r/min 转速下,发动机燃烧油焦浆达到最大输出功率点以前碳烟排放和燃烧柴油时比较接近,在达到最大输

出功率点时碳烟排放比发动机燃烧柴油时在该功率点的碳烟排放还小。这是由于转速较低,油焦浆中微小固体颗粒在燃烧室中停留时间较长,燃烧较充分,排气中未完全燃烧的固体颗粒较少;又由图 5 可知,在该转速下所消耗油焦浆中的柴油消耗量比燃烧柴油时的柴油消耗量少,因此在发动机燃烧油焦浆达到最大功率之前二者碳烟排放比较相近。在 1 200 r/min 转速下,发动机燃烧柴油时,随着负荷的增加混合气变浓,大量柴油被氧化成含碳颗粒,难以完全燃烧,碳烟排放急剧增加。但是由于油焦浆中

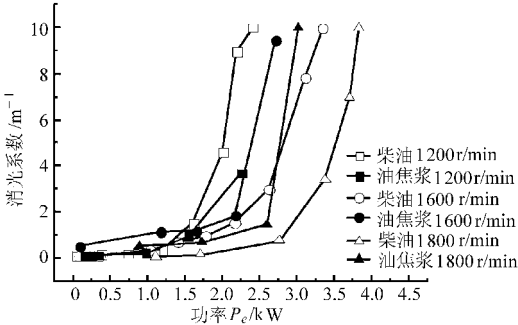


图 9 油焦浆和柴油的碳烟排放量对比

Fig. 9 Comparison of smoke emission between petroleum coke slurry and diesel

的微小固体颗粒在低转速下燃烧比较充分,油焦浆碳烟排放增加趋势平缓,因而发动机燃烧油焦浆达到最大输出功率点时碳烟排放低于柴油。

在 1 600、1 800 r/min 转速下,发动机燃烧油焦浆时的碳烟排放比柴油严重。这是由于随着转速的提高,油焦浆中的微小固体颗粒在燃烧室中停留时间较短,大量固体颗粒没有完全燃烧就随废气排出。

3 结论

- (1) 在 R180 型柴油机上安装油焦浆燃料供给系统,发动机燃烧油焦浆时能稳定运转,表明了新开发的油焦浆燃料供给系统初步解决了油焦浆中微小固体颗粒堵塞卡死针阀偶件和柱塞偶件的问题。
- (2) 燃烧油焦浆时发动机功率降低,排气温度升高,其主要原因是油焦浆的低热值低于柴油,油焦浆中石油焦颗粒的燃尽时间和着火滞燃期长。
- (3) 发动机燃烧油焦浆时,HC 和 CO 排放量与柴油接近;NO_x 排放量比柴油低;随着转速的提高碳烟排放比柴油严重。因而,油焦浆适合在低速柴油机中燃烧。

参 考 文 献

1 李本正,刘圣华,刘杰,等. 甲醇缸内直喷发动机均质燃烧特性研究[J]. 农业机械学报,2010,41(4):16~19.
Li Benzhen, Liu Shenghua, Liu Jie, et al. Experimental on homogeneous charge characteristics of direct-injection spark-ignition methanol engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4):16~19. (in Chinese)

2 李永军,于济业,柏雪源,等. 柴油机燃烧生物油/柴油乳化燃料的负荷特性[J]. 农业机械学报,2010, 41(增刊): 145~148.
Li Yongjun, Yu Jiye, Bai Xueyuan, et al. Bio-oil/diesel emulsion fuel load characteristics of diesel engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(Supp.):145~148. (in Chinese)

3 侯军兴,乔信起,张德全,等. 基于离散小波变换的二甲醚 HCCI 爆震试验[J]. 农业机械学报,2009,40(4):45~48.
Hou Junxing, Qiao Xinqi, Zhang Dequan, et al. Experimental analysis of knock in a DME HCCI engine using discrete wavelet transform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(4):45~48. (in Chinese)

4 姚春德,程传辉,张镇顺,等. 柴油/甲醇组合燃料发动机的微粒排放特性[J]. 内燃机学报,2008,26(4):302~306.
Yao Chunde, Cheng Chuanhui, Zhang Zhenshun, et al. Characteristics of particulate matter emission from a diesel/methanol compound combustion engine[J]. Transactions of CSICE,2008, 26(4):302~306. (in Chinese)

5 胡准庆,张欣. 模拟沼气发动机掺氢燃烧的试验研究[J]. 内燃机学报,2010,28(1):47~51.
Hu Zhunqing, Zhang Xin. Experimental study on engine combustion fueled with simulated biogas blends hydrogen [J]. Transactions of CSICE,2010,28(1):47~51. (in Chinese)

6 彭美春,王贤烽,王海龙. 柴油-生物柴油-乙醇混合燃料发动机的醛类化合物排放特性研究[J]. 内燃机学报,2010, 28(2):127~132.
Peng Meichun, Wang Xianfeng, Wang Hailong. Study on aldehydes emission of BE-D blend fuel engine [J]. Transactions of CSICE,2010,28(2):127~132. (in Chinese)

7 韩旭,李振中,冯兆兴,等. 石油焦渣油浆燃烧特性的试验研究[J]. 工程热物理学报,2000,21(6):774~778.
Han Xu, Li Zhenzhong, Feng Zhaoxing, et al. Experimental study on combustion behaviors of petroleum coke residual oil slurry [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21(6):774~778. (in Chinese)

- 7 Peter Broqvist, Henrik Gröbeck, Erik Fridell. Characterization of NO_x species adsorbed on BaO: experiment and theory[J]. J. Phys. Chem. B, 2004, 108(11): 3 523 ~ 3 530.
- 8 Isabella Nova, Lidia Castoldi, Luca Lietti, et al. NO_x adsorption study over Pt-Ba/alumina catalysts: FT-IR and pulse experiments[J]. Journal of Catalysis, 2004, 222(2): 377 ~ 388.
- 9 Christian Hess, Jack H Lunsford. Mechanism for NO₂ storage in barium oxide supported on magnesium oxide studied by in situ Raman spectroscopy [J]. J. Phys. Chem. B, 2002, 106(25): 6 358 ~ 6 360.
- 10 Louise Olsson, Hans Persson, Erik Fridell, et al. A kinetic study of NO oxidation and NO_x storage on Pt/Al₂O₃ and Pt/BaO/Al₂O₃[J]. J. Phys. Chem. B, 2001, 105(29): 6 895 ~ 6 906.
- 11 Viviana G Milt, Ezequiel D Banús. Soot combustion and NO_x adsorption on Co, Ba, K/ZrO₂ [J]. Catalysis Today, 2008, 133 ~ 135: 435 ~ 440.
- 12 Mahzoul H, Brilhac J F, Gilot P. Experimental and mechanistic study of NO_x adsorption over NO_x trap catalysts[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 1999, 20(1): 47 ~ 55.
- 13 Chatterjee D, Deutschmann O, Warnatz J. Detailed surface reaction mechanism in a three-way catalyst [J]. Faraday Discuss, 2002, 119: 371 ~ 383.
- 14 Matarrese R, Castoldi L, Lietti L, et al. Simultaneous removal of NO_x and soot over Pt-Ba/Al₂O₃ and Pt-K/Al₂O₃ DPNR catalysts[J]. Topics in Catalysis, 2009, 52(13): 2 041 ~ 2 046.
- 15 Karen S Kabin, Pranav Khanna, Rachel L Muncrief, et al. Monolith and TAP reactor studies of NO_x storage on Pt/BaO/Al₂O₃: elucidating the mechanistic pathways and roles of Pt[J]. Catalysis Today, 2006, 114(1): 72 ~ 85.
- 16 Lidia Castoldi, Roberto Matarrese, Luca Lietti, et al. Simultaneous removal of NO_x and soot on Pt ~ Ba/Al₂O₃ NSR catalysts [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2006, 64(1 ~ 2): 25 ~ 34.
- 17 李志军, 张瀛, 马小强, 等. 吸附还原催化系统降低稀燃汽油机 NO_x 排放试验研究[J]. 内燃机学报, 2006, 24(2): 152 ~ 155.
- Li Zhijun, Zhang Ying, Ma Xiaoqiang, et al. Experimental study of NO_x reduction in the lean burn gasoline engine by absorber reduction catalysis system[J]. Transactions of CSICE, 2006, 24(2): 152 ~ 155. (in Chinese)
- 18 Burch R, Sullivan J A, Watling T C. Mechanistic considerations for the reduction of NO_x over Pt/Al₂O₃ and Al₂O₃ catalysts under lean-burn conditions[J]. Catalysis Today, 1998, 42(1 ~ 2): 13 ~ 23.
- 19 Reichert D, Bockhorn H, Kureti S. Study of the reaction of NO_x and soot on Fe₂O₃ catalyst in excess of O₂ [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2008, 80(3 ~ 4): 248 ~ 259.

(上接第 9 页)

- 8 蔡崧, 杨亚军, 罗勇刚, 等. 石油焦在旋风预燃室内燃烧的试验研究[J]. 动力工程, 2002, 22(2): 1 711 ~ 1 718.
- Cai Song, Yang Yajun, Luo Yonggang, et al. Tests of burning petroleum coke in a pre-combustor [J]. Power Engineering, 2002, 22(2): 1 711 ~ 1 718. (in Chinese)
- 9 Ryan III T W, Doge L G. Diesel engine injection and combustion of slurries of coal, charcoal, and coke in diesel fuel [C]. SAE Paper 840119, 1984.
- 10 Khandare S S, Garg R D, Gaur R R. Investigation on the use of solid fuels for diesel engine [C]. SAE Paper 872094, 1987.
- 11 Flynn P L, Hsu B D. Coal fueled diesel development[C]. SAE Paper 881159, 1988.
- 12 Prithiviraj M, Andrews M J. Atomization of coal water slurry sprays[C]. SAE Paper 940327, 1994.
- 13 柴保明, 王祖讷, 付晓恒. 小型高速柴油机燃烧精细油水煤浆的试验研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(9): 190 ~ 193.
- Chai Baoming, Wang Zune, Fu Xiaoheng. Research on high speed diesel engine fueled with ultra-clean micronized coal oil water slurry[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(9): 190 ~ 193. (in Chinese)
- 14 张强, 毛君, 段鹏文, 等. 柴油机燃用柴油/水煤浆混合燃料性能与排放研究[J]. 内燃机工程, 2007, 28(3): 76 ~ 79.
- Zhang Qiang, Mao Jun, Duan Pengwen, et al. Study of the performance and emissions of direct injection diesel engine operating on diesel/coal water slurry blends [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2007, 28(3): 76 ~ 79. (in Chinese)